

四种浮游生物的碎屑形成过程

林婉莲 刘鑫洲 刘建康

(中国科学院水生生物研究所)

提 要

本文就不同学者的观点,讨论了有机碎屑的具体定义问题。从有机碎屑产生的具体途径来看,细菌侵入已死亡的有机体这一时刻,就是碎屑形成的开始。

根据 Golterman 的藻类矿化概念,以细菌侵入藻细胞这一时相作为有机碎屑的开始期;作者将隆线蚤、水华束丝藻、螺旋鱼腥藻和铜绿微囊藻的碎屑开始期分别定为:心跳停止和细菌入侵(枝角类)、藻丝体断裂期(水华束丝藻及螺旋鱼腥藻)、灰蓝色细胞质显现期(铜绿微囊藻)。碎屑开始期及其后的各种形态均属碎屑范畴。

有机碎屑是生态系统的一个重要组成部分^[10]。天然湖泊中有机碎屑(亦称“腐屑”)结构与功能的研究,在我国正处在初始阶段。国外学者对有机碎屑的概念也有不同。Odum 和 Cruz (1963) 首先指出,有机碎屑的概念应该包括3个内容:(1)有机碎屑来源于动植物尸体;(2)有机碎屑是颗粒性的;(3)细菌等微生物生活于有机碎屑基质之中,从而消耗着其高蛋白的部分^[10]。

其后有些学者发现,有机碎屑除了来源于动植物残骸之外,无机物及气泡的表面,也可能吸附溶解性有机物而形成薄膜,微生物随即着生其上,从而形成有机碎屑^[6,11,12,13]。

Wetzel 等 (1972, 1978) 从不同角度对有机碎屑作过几种论述。他们强调指出,从营养级平衡角度看,应给有机碎屑下定义为:任何营养级的未被动物同化的有机碳(包括排粪、排泄、分泌)^[11,14]。在上述概念中, Wetzel 等所指认的有机碎屑,既包括颗粒性的,也包括溶解性的,但不涉及与碎屑有关的动植物区系,也不直接涉及细菌的作用。

Golterman (1972) 认为,藻类死亡后,经过一个自溶阶段,细菌才和死了的藻细胞直接接触,随后导致藻细胞矿化,形成有机碎屑。他作了一个实验,证明藻细胞死亡后,不经过自溶阶段,细菌就不能侵入细胞体,碎屑也不会形成^[7]。

Harrison 及 Mann (1975) 对大叶藻 (*Zostera marina* L.) 的碎屑形成的描述,与 Golterman 的有关阐述是基本一致的^[8]。

综上所述,Odum 和 Wetzel 等学者是从生态系统的功能方面来论述有机碎屑的概念的,他们并没有指出有机碎屑产生的具体过程。Golterman 本是从生化的角度来研究藻类的矿化过程的,但他的实验却正好从细菌与有机体发生直接接触这一点上阐述了有机

碎屑产生的具体途径。本文所采用的有机碎屑概念,正是以 Golterman 的藻类矿化概念为依据的。

为探讨颗粒有机碎屑在东湖生态系统中的功能,必须首先掌握东湖水生生物优势种在死亡后所经历的形态变化。作者在武汉东湖各湖区的浮游生物优势种中,选用浮游动物中的隆线蚤 (*Daphnia carinata* ssp.)、蓝藻“水华”中的水华束丝藻 (*Aphanizomenon flos-aquae*)、螺旋鱼腥藻 (*Anabaena spiroides*) 和铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 作为材料、用人为的方法促其死亡、然后观察其碎屑的形成过程。本文把细菌侵入已死有机体的时相作为有机碎屑形成的开始期,并根据其分解过程中的形态特点,各分为几个时期,为东湖颗粒有机碎屑的定性及定量工作提供依据。

方 法

1. 关于隆线蚤

枝角类是武汉东湖浮游动物的重要组成部分^[3,4],一年之中,出现以透明蚤 (*Daphnia hyalina*) 与隆线蚤为主的相互交替的优势种。笔者(1979—1980年)选择的观察材料是用40目绵纶网,从湖中采集的隆线蚤。在室内以60目铜筛浓缩,并置于自来水龙头下反复洗涤,除去异物。

经清洗并浓缩的隆线蚤移入烧杯(容量1升),杯中盛经过25号网双层过滤的湖水400毫升。为避免灰尘落入,杯口用双层纱布盖扎。置于26—30℃,逐日观察隆线蚤的死亡分解过程。

2. 关于三种蓝藻

在水华束丝藻、螺旋鱼腥藻及微囊藻水华出现时期,用25号浮游生物网从东湖采集水样,在显微镜或解剖镜下,用解剖针及微吸管挑选出单个群体,放在玻片上,用吸移管滴入1滴经双层25号筛绢过滤的湖水,再盖上盖玻片。为避免玻片上的水干涸,除注意经常在其上加入适量的湖水外,用15厘米口径培养皿,内放玻璃架,垫以清洁纱布,并放入适量的水,然后把玻片放在玻璃架上,盖上培养皿。置室温下,或放在恒温箱内,每隔1—2小时用高倍镜(×400)观察一次。在这种条件下,蓝藻会逐渐死亡。

本实验在1979年初步观察的基础上,1980年重复观察多次,并用放在烧杯中的群体作对照。经伊红染色或荧光显微镜检查藻体的死活,用涂片法检查细菌入侵有机体的情况。

结 果

1. 隆线蚤个体死亡分解过程

在20—30℃温度下,隆线蚤个体死亡分解过程,按分解程度可划分为4个时期,所需时间为14—21天。

(1) 开始分解: 经放置2—5天,隆线蚤心脏停止跳动,细菌、纤毛虫增殖,活跃在隆

线蚤尸体周围、体表及头部,并侵入壳瓣腔,蚤体开始被分解(图版 I:1)。(2) 初期分解: 6—10 天,隆线蚤体形清晰可辨,内脏器官则逐渐被分解,细菌、纤毛虫活跃(图版 I:2)。(3) 基本分解: 11—13 天,隆线蚤体形模糊,内脏器官不易辨别,纤毛虫少量,细菌大量增殖(图版 I:3)。(4) 完全分解: 14—21 天,隆线蚤外貌不可辨认,只可见到难分解的胸肢、触角、大颚及甲壳等(图版 I:4)。

2. 隆线蚤群体死亡分解过程

在 26—30℃ 下,隆线蚤群体死亡至完全分解大约需 10—15 天时间。

经 1—2 天,隆线蚤部分死亡,沉入烧杯底部。3—5 天,隆线蚤大部分死亡,在烧杯底部形成淡黄色絮状沉淀。由于细菌分解作用,水质发臭且混浊,纤毛虫活跃。7—10 天,杯中水清澈,细菌大量增殖,杯底部有灰白色的絮状沉淀物,其周围由一层胶状物质粘裹,内部有分散开的胸肢、大颚、触角、介壳及颗粒等。15 天后,杯底出现以盘星藻(*Pediastrum* sp.) 为主的绿藻。30 天后,絮状物和隆线蚤的残骸消失,颗粒物也少见,出现大量以栅藻(*Scenedesmus* sp.) 为主的蓝藻和细菌。

隆线蚤各组织器官的分解有难易之别。其中卵、卵巢、心脏、肠道及壳刺等容易分解;胸肢、大颚、触角、介壳难分解。总之,蚤体肉质部分容易分解,角质部分不易分解。

隆线蚤分解过程中,常常在头部,躯干部出现数目与大小不等、无固定形状的不透明颗粒,这些颗粒可分散到蚤体周围的水中。颗粒物出现的机率,幼蚤多于成体。

隆线蚤的分解是细菌(图版 1:6)、纤毛虫(图版 1:5)参与的结果。纤毛虫能直接利用蚤的尸体作食料,它们在蚤体开始分解、初期分解时期相当活跃,或游动于蚤的尸体周围,或布满蚤体各部位。细菌自始至终参与分解活动,隆线蚤尸体的后期分解主要依赖于细菌。参与分解蚤体的细菌和纤毛虫并无特异性,从形态与运动能力判断,常见的细菌有球杆菌、短杆菌、大杆菌及梭状菌。它们或有芽孢或无芽孢,这样的细菌在东湖水中广泛存在。

根据细菌入侵蚤尸体这一原则,我们把心跳停止、细菌入侵定为隆线蚤的碎屑开始期。

3. 三种蓝藻的碎屑形成过程

(1) 水华束丝藻和螺旋鱼腥藻的分解过程: 水华束丝藻观察过程的水温范围为 17.5—24.0℃,螺旋鱼腥藻观察过程的水温范围为 18.0—28.0℃。这两个种的整个降解过程可归纳为: (1) 伪空胞破裂期; (2) 藻丝体断裂期; (3) 胶体形成期; (4) 胶体老化期。在上述水温条件下,水华束丝藻整个分解过程,历时约 5—15 天;螺旋鱼腥藻历时约 8—17 天。

水华束丝藻为丝状群体,藻丝体集成束,在活的情况下,难以把它的单个藻丝体分开。从已测量的细胞大小看,藻丝体一端的细胞较长较狭(长约 14—17 微米,宽约 3—4 微米),中部及另一端细胞较短较宽(长约 5—7 微米,宽约 3—6 微米)。在细胞较长的一端,细胞内伪空胞排列稀疏;中部和另一端的细胞中,细胞伪空胞排列致密(图版 II:1)。异形胞在藻丝体中部呈圆筒形,长约 10 微米,宽约 7 微米。孢子呈长圆筒形或椭圆形^[2]。

用伊红染色,可判别细胞的死活。活体对伊红不着色,垂死的细胞被染成淡棕黄色,已死的细胞被染成红色。不论用一般镜检法或涂片法检查,活的藻丝体上未发现细菌存在。

螺旋鱼腥藻为单一藻丝体,弯曲,往往自身缠绕成团。细胞长约7微米,宽约6—8微米。暗红色的伪空胞明显(图版 II:5)。整个藻体为亮黄带铜绿色。孢子紧连异形胞^[2,3]。

在活藻丝体期,未见有细菌活动。

根据玻片上的观察结果,藻丝体死亡后的降解过程如下:

A. 伪空胞破裂期: 水华束丝藻在玻片上“培养”1—3天,细胞中伪空胞破裂成小颗粒,细胞原来的鲜绿色变淡(图版 II:2)。此时藻丝体上未见细菌,群体周围则有少量细菌,个别玻片在培养液中出现纤毛虫。

螺旋鱼腥藻在玻片上“培养”1天左右,伪空胞便破裂(图版 II:6)。其他情况与同期的束丝藻一样。

B. 藻丝体断裂期: 水华束丝藻伪空胞破裂期持续4—5小时后,藻丝体便开始断裂。首先是长细胞一端的细胞断裂(图版 II:3)。断裂出的细胞数量不等,有时是单个,有时则几个一起脱落,然后才断成单个。此时细胞上及培养液中有明显的细菌活动。随着断裂出来的细胞数量增多,细菌和纤毛虫的数量也增多。

螺旋鱼腥藻在伪空胞破裂后约一天,藻丝体开始断裂出数量不等的细胞小断片(图版 II:7),然后再断成单个细胞。其他情况类似束丝藻。

C. 胶体形成期: 水华束丝藻在端细胞断裂之后,其余细胞便很快地完全破裂成不透明的、微黄带绿、具有点状红色反光的细胞碎片,有的碎片仍具细胞壁(图版 II:4)。由于解体程度不同,碎片大小各异,但都有粘稠感。水不足的玻片上,如没有外力作用,碎片多重叠集中,只有少量分散。水充足的玻片,碎片往往粘附成不定形的胶体状物,悬浮于水中;加上有分散的碎片存在,这时玻片上的水也显得有粘性。这时,细菌在此等碎片上大量繁殖,纤毛虫也很活跃。

同期的螺旋鱼腥藻情况相似。

D. 胶体“老化”期: 胶体形成初期,呈淡黄绿色或黄褐色,胶体量较多,除较大的胶体团块外,水中悬浮着许多分散的胶体颗粒。此时细菌大量繁殖,纤毛虫数量很多。其后,分散的胶体颗粒逐渐消失,胶体团块的体积逐渐变小,细菌和纤毛虫数量也随之下降,胶体团块上相继出现许多纤毛虫孢囊。这时胶体便进入“老化”期。经过一段时间,胶体的体积不再有多大变化,处于相对稳定期。此时,水中基本上不见细菌,除了孢囊外,仅有个别纤毛虫活动。

胶体老化期情况,在水华束丝藻中和螺旋鱼腥藻中都一样。

用1000毫升烧杯盛着有束丝藻水华的湖水500毫升,在24℃室温下“培养”作为对照,静置1—2天,束丝藻便自然死亡。随着藻体逐渐死亡,水色从无色变成黄绿色,甚至蓝色。此时镜检,可见水中悬浮着无数单个细胞或细胞段。又过1—2天,水面出现蜡状薄膜,镜检可见无数细菌排列致密而规则,有些则连成链状向下延伸。水华量越大,断裂出来的细胞越多,水色越深,出现的细菌越多,蜡状膜越厚。后来,水又逐渐变成乳蓝色乃至乳白色。在显微镜下,除大量细菌外,还出现大量纤毛虫,水中悬浮着无数不定形的胶体团块。随后细菌数量逐渐减少,纤毛虫孢囊数量逐渐增多,胶体团块数量和体积也相对

下降,逐渐达到稳定期。这种情况和在玻片上所经历的情况基本相符,螺旋鱼腥藻和水华束丝藻的降解也无多大差别。处于相对稳定期的胶体,静置 3—4 个月,仍基本保持原状。

(2) 铜绿微囊藻的分解过程: 观察过程的水温范围为 22.5—24.5℃。

在玻片上整个降解过程历时 7—20 天。其碎屑形成过程可归纳为 5 个阶段: (1) 细胞膨胀期; (2) 伪空胞破裂期; (3) 灰蓝色细胞质显现期; (4) 黄褐色物质出现期; (5) 胶囊内含物消失期。

铜绿微囊藻群体幼期是一种球形、亚球形或长圆筒形而中实的藻体,胶囊不明显。成长的群体多分裂成网状或“窗格”状(图版 III: 1 和 2), 群体团块肉眼可见, 呈橄榄绿色或铜锈绿色。幼体细胞直径一般为 3.3 微米, 个别达 4.5 微米, 暗红色伪空胞很明显, 因而整个幼期群体铜锈绿色不明显, 绿中略带红色。成体细胞直径为 5—6 微米。成体除有明显的群体胶囊外, 各个细胞还有本身的胶囊, 这种胶囊呈圆形或多角形。有些细胞两个贴连在一起, 两个胶囊便排列成双金钱状。成体细胞铜锈绿色比红色显著^[1,2,5]。

用荧光显微镜检查, 活的铜绿微囊藻为红色, 在其细胞膨胀期, 则为暗红色。随着细胞解体程度深化, 群体逐渐呈蓝绿色。

根据玻片上的观察结果, 铜绿微囊藻死亡后降解过程如下:

A. 细胞膨胀期(图版 III: 3 和 4): 新采来的样品经 2—3 天玻片“培养”后, 群体内的细胞开始膨胀。膨胀后的细胞直径一般可达 6.7 微米左右, 有时还更大些。此时, 红色的伪空胞有凸起感。在显微镜下, 细胞中央部分红色很明显, 外缘裸露出一圈灰蓝色细胞质, 灰蓝色细胞质之外又是一圈红色结构, 故整个细胞原来的铜锈绿色变得不明显。特别是单个细胞从群体上脱落后处于膨胀期的时候, 这种情况更显著。此期间, 细菌一般集中在胶囊边上或“窗格”内, 但尚未与藻细胞直接接触。

B. 伪空胞破裂期(图版 III: 5 和 6): 细胞膨胀 1—2 天后, 伪空胞便破裂成红色碎片。随着此等红色碎片的增多, 红色与灰蓝色细胞质及群体其余的绿色互相交辉, 闪烁着美丽的色彩。由于红色碎片的存在, 此时胶囊内含物的形状像糠屑一样。伪空胞破裂时, 一般不见细菌参与细胞的破裂活动。

C. 灰蓝色细胞质显现期(图版 IV: 2): 继上述时期约一天之后, 红色碎片逐渐消失, 呈现出灰蓝色细胞质, 此时尚可见到细胞原来的外形。细菌开始侵入部分胶囊内。

D. 黄褐色物质出现期(图版 IV: 3): 玻片“培养”7 天以后, 群体内细胞完全解体, 灰蓝色细胞质消失, 代以黄褐色物质。此类物质无具体的颗粒形态, 呈糊状, 充塞在胶囊内, 并有密密麻麻的细菌在其中蠕动。群体仍保持原来的外形。

E. 胶囊内含物消失(图版 IV: 4): 经过一段较长时间, 群体胶囊中的黄褐色糊状物逐渐消失, 整个群体余下无色透明、无内含物的胶囊。一般情况下, 此时仍可见数量不等的细菌在胶囊内活动, 偶然也可在其中见到纤毛虫或个别未完全解体的细胞。在玻片上, 完全透明无物的胶囊不易见到, 胶囊多带有少数未完全解体的细胞。但在烧杯“培养”的对照组内, 透明无物的胶囊比比皆是。

用同样的方法观察铜绿微囊藻的幼体死亡降解过程。幼体细胞死亡, 也经历膨胀、伪空胞破裂等阶段。幼体细胞在膨胀后直径可达 4 微米左右, 红色伪空胞很明显。由于同

一群体内各细胞死亡时间先后不同,在低倍镜下见到的是绿色细胞和红色细胞相间。随着伪空胞破裂期出现,绿色逐渐变暗,整个群体呈淡红色。细胞膨胀后,需经一段较长时间,伪空胞才破裂。灰蓝色细胞质期不明显,也不出现明显的黄褐色糊状物。最后群体呈现浅灰色,或仍残留若干未完全解体细胞的无色半透明胶体。这种胶体,经历很长时间后,基本形态仍不变。细菌是在伪空胞破裂后才逐渐繁殖起来的。

在观察铜绿微囊藻死亡变化的同时,也观察了水华微囊藻 (*M. flos-aquae*) 成体的降解过程。水华微囊藻成体的降解过程与铜绿微囊藻的幼体情况相似。

讨 论

有机碎屑应包括颗粒性有机碎屑和溶解性有机碎屑两方面^[11,14],但二者之间的区别并没有十分明确的界线。在定量手段上,就某种程度来说,收集对象的颗粒大小级别是人为的,它仅取决于所用滤器孔径的大小。目前用的滤器孔径,一般能拦截到的颗粒有机物大小为0.2—2.0微米,因而通过滤器成为“溶解性”有机物的一个可观部分,事实上仍是天然胶体或颗粒。滤器孔径更小些,自然可收集到更多的颗粒更小的颗粒性物^[9]。

本文研究的目的在于考察有机碎屑产生的具体途径,并不考虑其颗粒的大小。

本文就研究对象所下的有机碎屑定义,以 Golterman 的藻类矿化概念为依据,把细菌入侵有机体的时间,定为有机碎屑的开始期。碎屑开始期及其后的各种形态,都是碎屑。Golterman 着重于藻类矿化的生化过程,本文则着重于藻类死亡后的形态变化。根据形态变化特征,把所观察的3种蓝藻碎屑开始期分别划定如下:

水华束丝藻:藻丝体断裂期;

螺旋鱼腥藻:藻丝体断裂期;

铜绿微囊藻:灰蓝色细胞质显现期。

与 Golterman 的实验比较,上述3种蓝藻在伪空胞破裂期,未见细菌入侵细胞,可看作是死亡到自溶这一阶段。藻丝体断裂期及灰蓝色细胞质显现期间,细菌侵入细胞,导致藻类细胞质分解,出现矿化,形成碎屑。

在实验室条件下,此等藻类从死亡到碎屑形成期,所经历的时间是很短的。例如,水华束丝藻和螺旋鱼腥藻从伪空胞破裂到藻丝体断裂,微囊藻从伪空胞破裂到灰蓝色细胞质显现期,过渡时间都仅在1天或几小时以内。在东湖水中悬浮物的实际调查中,水华束丝藻和微囊藻的死后形态多为伪空胞破裂期;藻丝体断裂期及灰蓝色细胞质显现期发现的机率很小;螺旋鱼腥藻的藻丝体断裂期则为常见的碎屑形态。枝角类中,壳瓣腔内有内含物的碎屑几乎没有遇到。这类情况的存在,可能由于天然水体中相互制约的因子很复杂,某些浮游生物死后,从自溶阶段到矿化作用出现的时间极短,或由于某种别的原因,致使其碎屑开始期不易见到。因此,在东湖有机碎屑的定量实际工作中,我们是从常见的碎屑形态中选择最接近实验室观察到的一种形态,视作该种浮游生物的碎屑开始期。

浮游动物的碎屑形成过程,未查及有关资料。我们对隆线蚤的死亡过程观察,除形态观察外,未作任何生化测定,划定的隆线蚤碎屑形成开始期是以细菌入侵蚤尸体这一时相为标准的,这一原则是否合适,有待于今后进一步验证。

3 种蓝藻的后期碎屑, 都没有固定形态, 统称为“胶体”(铜绿微囊藻的胶囊虽有一定形态, 但其中黄褐色糊状物则是一种无定形的胶体)。所以称之为“胶体”, 并不是根据其颗粒大小而定的, 而是根据其呈现出粘稠感而定的。为避免与无机胶体相混, 这种“胶体”可称之为“生物胶体”。

参 考 文 献

- [1] 朱浩然, 1963。中国色球藻科志。南京大学学报, (1): 93—201。
- [2] 胡鸿钧、李尧英等, 1979。中国淡水藻类。10—56页。上海科学技术出版社。
- [3] 蒋雯治, 1965。武昌东湖枝角类种类组成与数量变动的观察。水生生物学集刊, 5(2): 220—237。
- [4] 蒋雯治、堵南山, 1979。中国动物志, 节肢动物门·甲壳纲·淡水枝角类。107 页。科学出版社。
- [5] Desikachary, T. V., 1971. Cyanophyta. Indian Council of Agricultural Research. p. 686 New Delhi.
- [6] Floodgate, G. D., 1972. The mechanism of bacterial attachment to detritus in aquatic systems. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.*, 29 (Suppl.): 309—323.
- [7] Golterman, H. L., 1972. The role of phytoplankton in detritus formation. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.*, 29 (Suppl.): 89—103.
- [8] Harrison, P. G. and K. H. Mann, 1975. Detritus formation from eelgrass (*Zostera marina* L.): The relative effects of fragmentation, leaching, and decay. *Limnol. Oceanogr.*, 20 (6): 924—933.
- [9] Holm-Hansen, O., 1972. The distribution and chemical composition of particulate material in marine and fresh waters. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.*, 29 (Suppl.): 37—51.
- [10] Odum, E. P. and A. A. de la Cruz, 1963. Detritus as a major component of ecosystems. *Amer. Inst. Biol. Sci. Bulletin*, 13(3): 39—40.
- [11] Rich, P. H. and R. G. Wetzel 1978. Detritus in the lake ecosystem. *Amer. Natur.*, 112: 57—71.
- [12] Rodina, A. G., 1966. Variety and destruction of lake detritus. *Verh. Int. Ver. Limnol.*, 16 (3): 1513—1517.
- [13] Sushenya, L. M., 1967. Detritus and its role in the production process in bodies of water. *Hydrob. J.*, 2: 77—83.
- [14] Wetzel, R. G., P. H. Rich, M. C. Miller and H. L. Allen, 1972. Metabolism of dissolved and particulate detrital carbon in a temperate hard-water lake. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.*, 29 (Suppl.): 185—243.

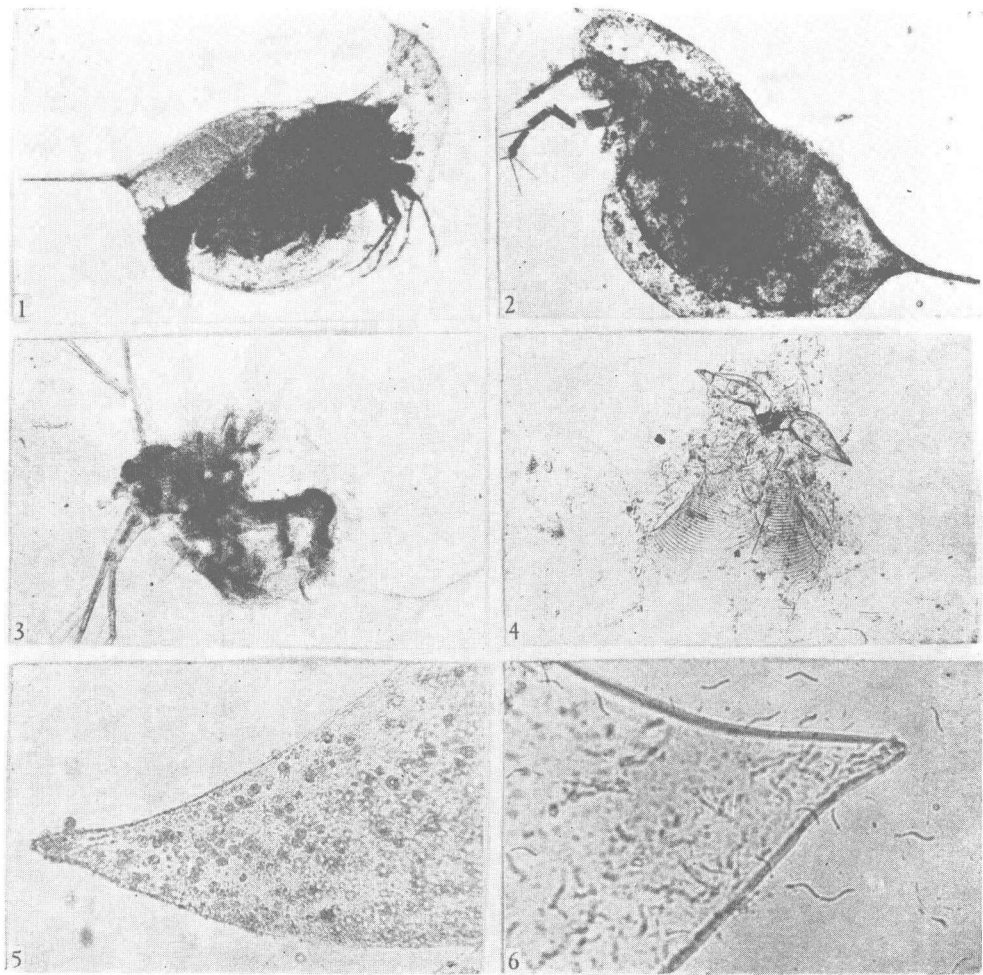
THE PROCESS OF DETRITUS FORMATION IN FOUR PLANKTERS

Lin Wanlian Liu Xinzhou Liu Jiankang

(*Institute of Hydrobiology, Academia Sinica*)

Abstract

With a view to evaluating the function of particulate organic detritus in the Donghu Lake ecosystem, the authors made a study on the morphological characteristics of the degradation products from predominant plankters in the Lake. Accordingly, 4 plankters, i. e., a cladoceran (*Daphnia carinata* ssp.) and three species of bluegreen algae (*Aphanizomenon flos-aquae*, *Anabaena spiroides*, and *Microcystis aeruginosa*) were chosen as material of this study. Specimens collected from the Lake were killed artificially and the processes of detritus formation were traced. The moment that bacteria begin to come into direct contact with the dead organisms is considered to be the initiation of detritus formation. Four to five stages are delineated for the afore-mentioned species. The results of the authors' observation, compatible with Golterman's concept of algal mineralization, provide basis for the recognition and quantification of particulate organic detritus in the Lake.

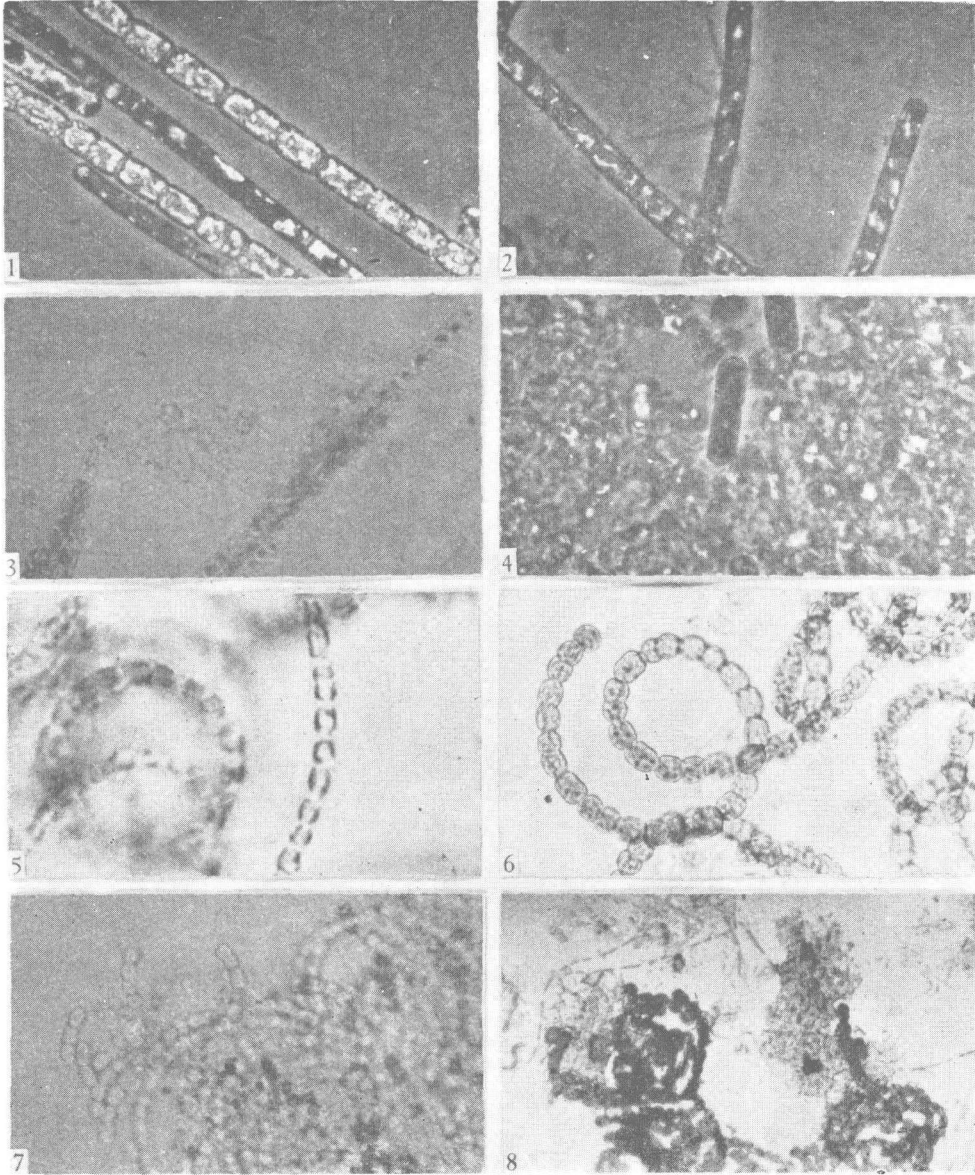


隆线溞的分解过程

图1 开始分解；图2 初期分解；图3 基本分解；图4 完全分解；
图5 参与分解的纤毛虫；图6 参与分解的细菌。

Degradation of *Daphnia carinata* ssp.

Fig. 1 Stage I; Fig. 2 Stage II; Fig. 3 Stage III; Fig. 4 Stage IV;
Fig 5 Ciliates in the helmet; Fig. 6 Bacteria in the helmet.



水华束丝藻与螺旋鱼腥藻的碎屑形成过程

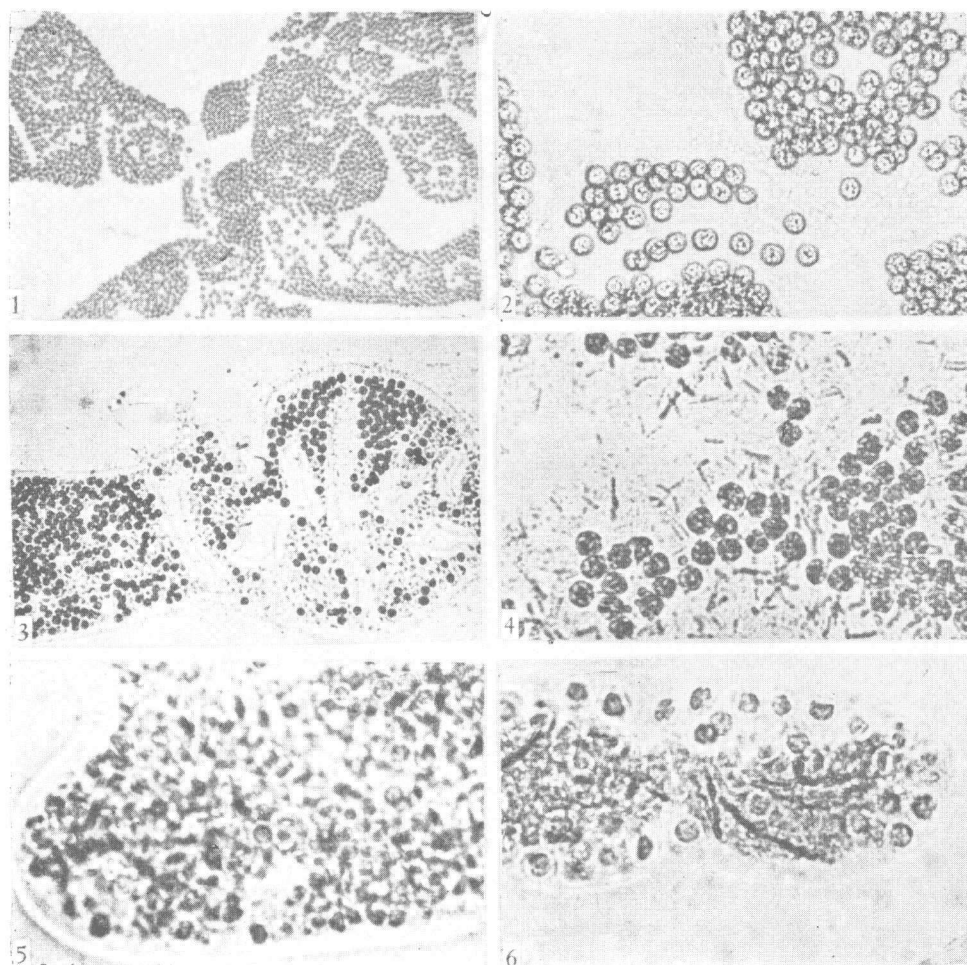
图 1 活体时藻丝体的伪空胞形态 (示长细胞端的细胞及中部细胞); 图 2 伪空胞破裂及细菌入侵; 图 3 端细胞断裂; 图 4 藻丝体完全断裂; 图 5 活体时藻丝体的伪空胞排列形态; 图 6 伪空胞破裂; 图 7 藻丝体断裂; 图 8 藻丝体断裂时的细菌繁殖情况 (细菌染片法)。

(1, 2, 3 和 4 示水华束丝藻; 5, 6, 7 和 8 示螺旋鱼腥藻)

Detritus formation of *Aphanizomenon flos-aquae* and *Anabaena spiroides*

Fig. 1 Pseudovacuoles in the fresh trichome; Fig. 2 Pseudovacuoles broke into fragments of red color and the attachment of bacteria; Fig. 3 The trichome at the long-cell-end broke into particles; Fig. 4 Trichome broke down almost completely. (1, 2, and 4, photo by phase contrast microscopy) Fig. 5 Pseudovacuoles in the fresh trichome; Fig. 6 Pseudovacuoles broke into fragments; Fig. 7 The trichome broke down; Fig. 8 The development of bacteria during the breakdown of the trichome (photo of a slide prepared with Gram Stain).

(Fig. 1, 2, 3 and 4 for *Aphanizomenon flos-aquae*, 5, 6, 7 and 8 for *Anabaena spiroides*)



铜绿微囊藻的碎屑形成过程

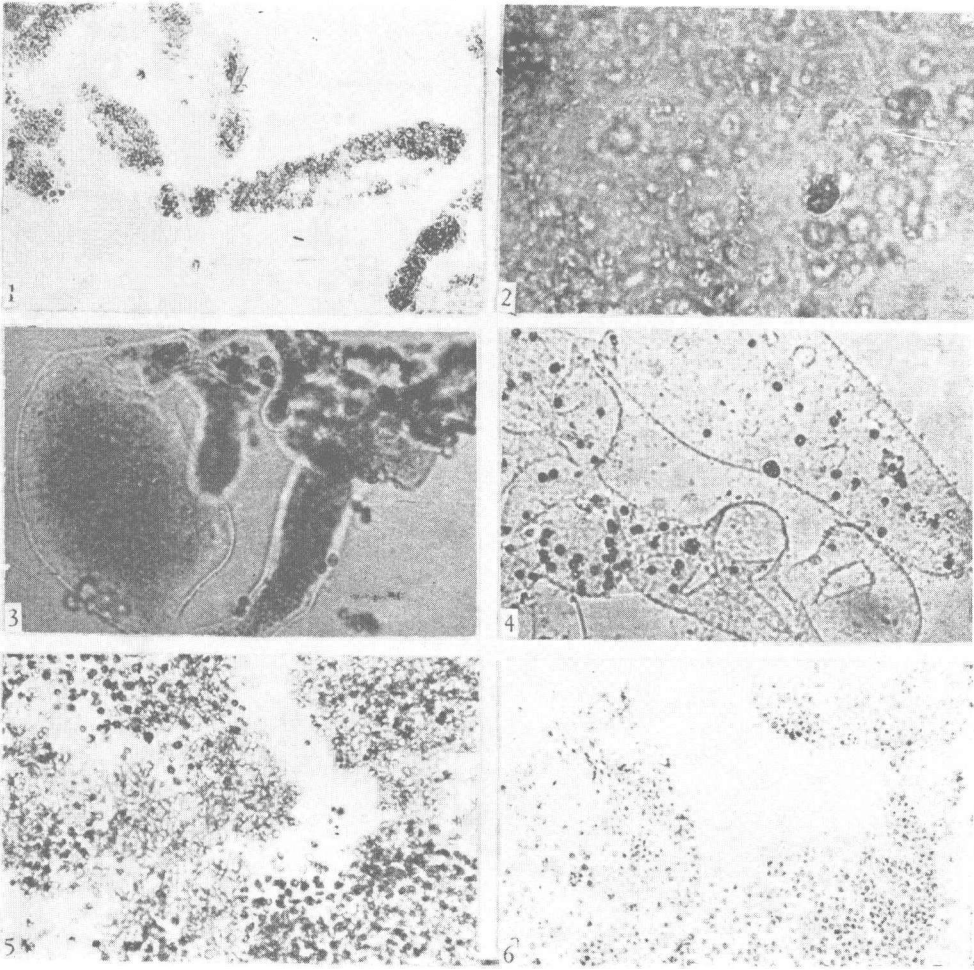
图 1, 2 活体时细菌在窗格内分布情况；图 3, 4 细胞膨胀期间细菌入侵；

图 5 伪空胞开始破裂；图 6 伪空胞破裂后出现红色微小碎片。

(放大：图 1 及 3 为 10×10 ；图 2, 4, 5 及 6 为 10×40)

Detritus formation of *Microcystis aeruginosa*

Fig. 1 and 2 Fresh colony, showing bacteria within the clathrates; Fig. 3 and 4 The swollen up cells and the attachment of bacteria, among the bacteria there are cells of *Phormidium mucicola*; Fig. 5 The pseudovacuoles broke down; Fig. 6 The fragments resulted from the breakdown of pseudovacuoles.



铜绿微囊藻的碎屑形成过程(续)

图1 多数伪空胞已破裂； 图2 红色碎片逐渐消失，灰蓝色细胞质显现； 图3 同一个铜绿微囊藻群体中，左半为伪空胞破裂后出现红色碎片，右半出现黄褐色糊状物； 图4 铜绿微囊藻胶囊内黄褐色糊状物逐渐消失； 图5 水华微囊藻（部分细胞的伪空胞已破裂）； 图6 铜绿微囊藻的幼体（部分细胞的伪空胞已破裂）。

Detritus formation of *Microcystis aeruginosa* (continued)

Fig. 1 Most of the pseudovacuoles broke down; Fig. 2 The cells with blue-grayish cytoplasm after the fragments of pseudovacuoles disappeared; Fig. 3 Left half of the single colony shows the red fragments; and the right half shows the brownish mass; Fig. 4 The disappearance of the brownish mass in the gelatinous sheath; Fig. 5 Many of the pseudovacuoles broke down within the cells of *M. flos-aquae*; Fig. 6 The juvenile of *M. aeruginosa*, showing many of the pseudovacuoles broke down within the cells.